

Accident avec une bouteille en matériau tout composite:

Résultat de l'analyse

A la suite de plusieurs incidents impliquant des bouteilles pour appareils de protection respiratoire, et plus particulièrement après l'accident survenu à la caserne des sapeurs-pompiers de l'aéroport de Genève (SSA) le 2 octobre 2002, qui mettait en cause une bouteille d'air comprimé en matériau tout composite, la Fédération suisse des sapeurs-pompiers (FSSP) a mandaté le Centre technique des industries mécaniques (CETIM) de Nantes (F), pour effectuer une analyse de défaillances de ce type de bouteilles, sur recommandation de la Police judiciaire du canton de Genève.

Nous reproduisons ci-après le résumé du procès-verbal du CETIM qui comporte 190 pages.

Ce résumé a été présenté le 9 mai 2003 aux fabricants et fournisseurs d'appareils de protection respiratoire ainsi qu'au groupe de travail de la FSSP pour les questions techniques de protection respiratoire.

Une présentation détaillée de ce résumé a également été effectuée dans le cadre de la séance ordinaire de la Conférence des inspecteurs du service du feu le 23 mai 2003 à Steffisburg.

1. Contexte de l'étude

La Fédération suisse des sapeurs-pompiers décompte à ce jour plusieurs incidents relatifs à des bouteilles «tout composite» pour appareils respiratoires (ARI): apparition de fuites plus ou moins importantes, rupture au niveau du robinet.

L'un des cas les plus préoccupants concerne un accident survenu dans une caserne (SSA Genève).


Les faits suivants ont été relatés par différents témoins:

- un pompier sort une bouteille ARI de son cadre en la prenant par la vanne,
- il entend comme une explosion et sent de l'air au niveau de son pantalon,
- il entend une seconde explosion et lâche la bouteille qui devient une «fusée incontrôlable», s'élevant jusqu'au plafond et s'encastrant dans l'une des portes de la caserne (empreinte de la vanne dans cette porte),
- au final, la bouteille présente une déchirure vers le bas du cylindre composite (côté opposé à la vanne) et une rupture de la vanne.

L'emplacement des différents éléments de la bouteille (robinet, réservoir composite) après l'accident ainsi que les impacts laissés sur le plafond et la porte de la caserne sont représentés sur les schémas 1 et 2.

Plusieurs clichés transmis par la Fédération complètent cette description (clichés 1–10).

Folio 1/13



Destinataire
Fédération Suisse Des Sapeurs Pompiers
 Morgenstrasse 1
 Postfach
 CH-3073 GÜMLIGEN
A l'attention de Messieurs Jean Luc BERNEY et Claude BERGER

Établissement de Nantes
 74, route de la Jonelière
 BP 82617
 44326 Nantes Cedex 3
 Téléphone : 02 40 37 36 35
 Télécopie : 02 40 37 36 99

Réf. de la demande Courrier réf. rs/be du 21/11/02.

RESUME

Prestation n° 744644/6D1/4a Date : 29 Avril 2003

Objet :
 Analyse de défaillances de bouteilles composites pour appareils respiratoires.

Éléments remis par le demandeur :
 - Bouteilles ARI
 - Documents

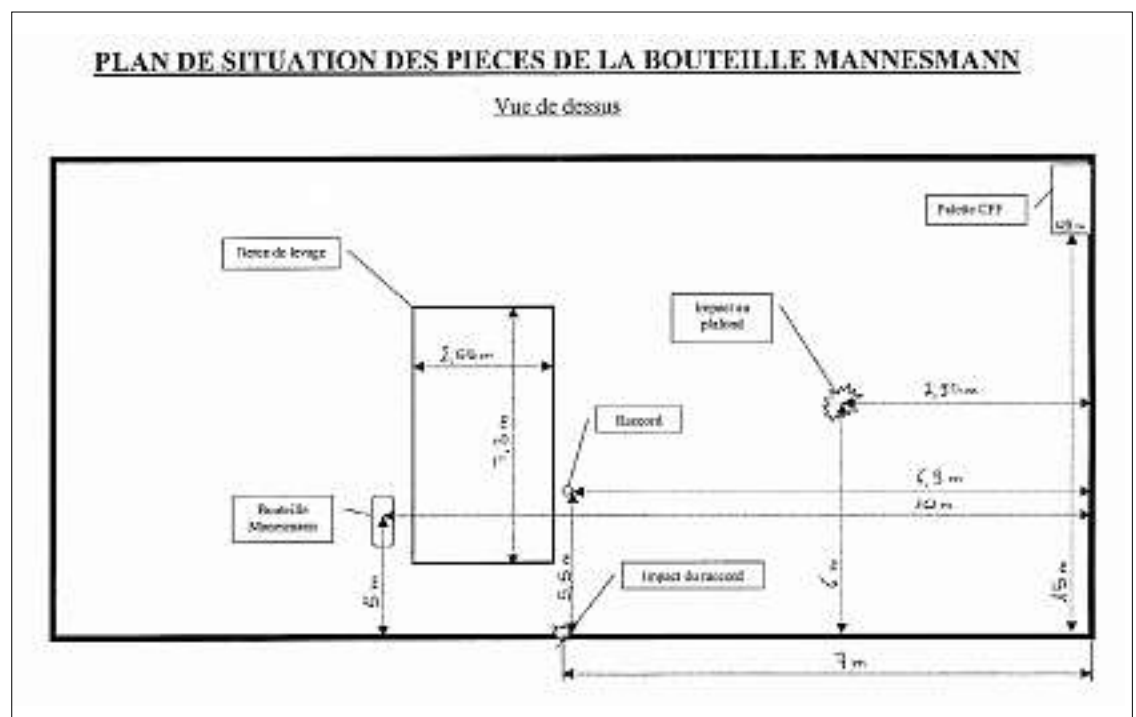
F 02 6 0156

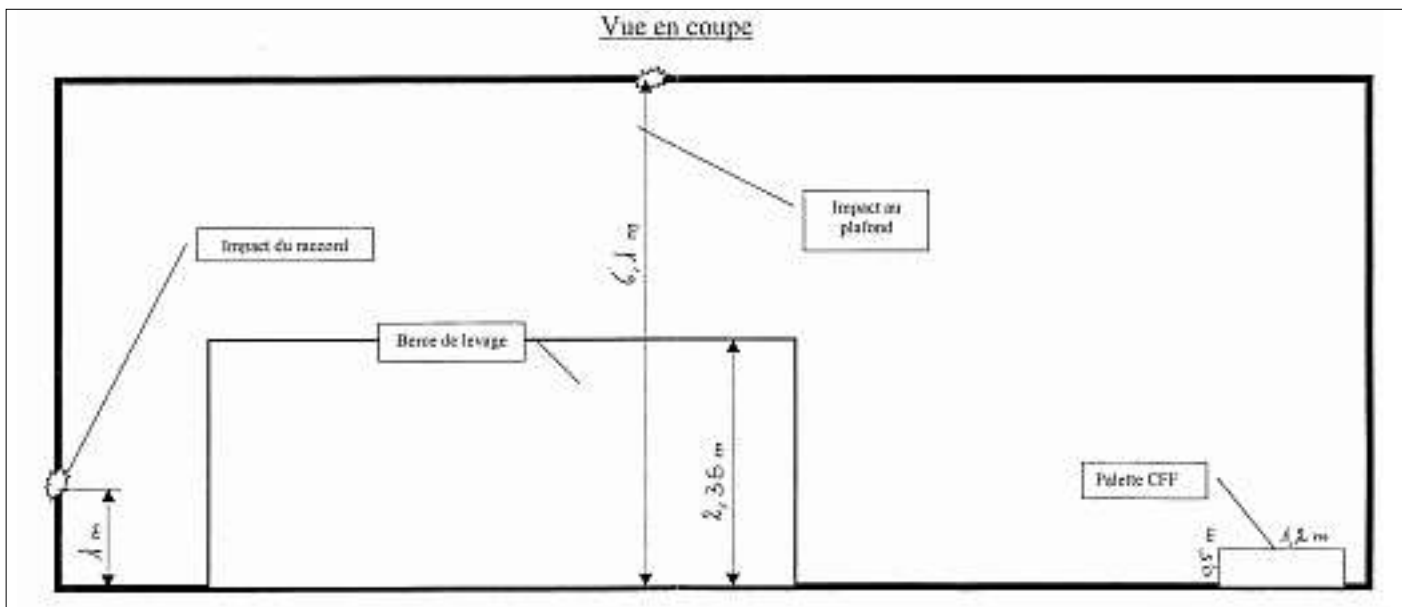
Figure 1

Les clichés 14–16 décrivent l'aspect de la bouteille n° 1 après l'accident:

Suite à cet incident, la Fédération Suisse des Sapeurs-pompiers a fait appel au CETIM dans le cadre de l'expertise de ces bouteilles «tout composite» afin:

Schémas 1





Schémas 2

- d'apporter des éléments de compréhension à l'apparition d'une déchirure au niveau du réservoir composite,
- d'établir le scénario le plus probable lors de l'incident qui a lieu dans cette caserne à Genève,
- d'identifier l'origine des fuites et de tenter d'établir leur évolution en fonction de la montée en température à laquelle ces bouteilles peuvent être soumises lors d'une intervention sur un incendie.

Les travaux ont donc porté sur:

le réservoir composite:

- contrôle de la qualité de fabrication du réservoir composite de la bouteille ARI impliquée dans l'incident de Genève (nature et état de polymérisation de la résine, teneur en fibres de carbone, séquences d'empilement, épais-

Clichés 1-4





Clichés 5–10



seurs du cylindre, taux de porosités, caractéristiques mécaniques résiduelles);

- réalisation d'une analyse macro- et microscopique de la déchirure présente dans le réservoir composite afin d'identifier le mode fondamental de ruine et de mettre en évidence d'éventuels défauts de fabrication;
- analyse mécanique du comportement du réservoir sous pression, en température (lors du remplissage et du vidage de la bouteille), sous l'effet d'un choc. Evaluation de l'influence des contraintes internes.

le robinet:

- analyse morphologique des ruptures de deux robinets (l'une étant présente sur la bouteille de Genève) afin de déterminer leur mode de ruine;
- caractérisation métallographique des robinets (vérification de la qualité du matériau);
- évaluation de la contrainte appliquée au niveau du robinet lorsque celui-ci est monté sur une bouteille ARI avec un couple de serrage donné.

l'étanchéité du système:

- évaluation du niveau de fuite des bouteilles sous 300 bars;
- mesure de l'évolution de ces fuites à -50°C et $+70^{\circ}\text{C}$;
- détermination de la pression d'éclatement des bouteilles;
- mesure de l'évolution des fuites après des essais de chutes, après cyclage en pression;
- détermination de la fuite entre le liner et l'insert en aluminium.

Tous nos travaux sont effectués dans le cadre du Plan Assurance qualité du Pôle d'Activité «Ingénierie en Matériaux et Structures Plastiques, Composites, Elastomères & Peintures» certifié ISO9001 (version 2000).

2. Pièces fournies

- bouteilles ARI (dans l'ordre d'envoi): (Tableau 1)
- Plans MCS des bouteilles 6,8 litres (réf. 33930-S2d) et 9 litres (réf. 33867-S2b);
- plan du robinet (réf. K800-502.0-S2, K800-502.0.1, K800-500.0.1...);
- liste des opérations de fabrication et de contrôle des bouteilles (réf. MCS-TC/DI du 22.10.1997 et du 18.10.1999);
- tableaux décrivant les principaux tests d'agrément pour un réservoir entièrement bobiné (norme prEN12245) – Résultats d'essai EGI/Suisse;
- tests de remplissage d'une bouteille (évolution de la pression et de la tem-

N°	Référence de la bouteille ARI	Commentaires
1	707-1-00000459	Bouteille de 9 litres avec rupture du robinet et dont le réservoir composite présente une déchirure Incident Caserne SSA Genève
2	707-1-00000458	Bouteille de 9 litres – n° de fabrication proche de la bouteille n° 1 défailante
3	707-1-00001792	Bouteille de 9 litres présentant une fuite lors de son remplissage dès la première utilisation
4	701-1-00001173	Bouteille de 6,8 litres qui s'est vidée en 30 minutes après plusieurs années d'utilisation
5	707-1-00000550	Bouteille de 9 litres présentant une rupture au niveau du robinet
6	707-1-00000467	Bouteilles de 9 litres (sans précision)
7	707-1-00000532	Idem n° 6
8	707-1-00000447	Idem n° 6
9	707-1-00000470	Idem n° 6
10	707-1-00000450	Idem n° 6

Tableau 1: références des bouteilles ARI fournies.



Clichés 14-16



pérature) et résultats des tests d'éclatement (réf. 59/2003);

- certificats de conformité du Lupolen 4261 A, des fibres de carbone, du joint torique, des pièces métalliques (inserts), des protections contre le choc de l'ogive et du fond, de la résine;
- instructions de service relatives aux bouteilles MCS datant de 03/02 et 09/02;
- plan de situation des pièces de la bouteille Mannesmann après l'accident (et clichés).

3. Synthèse des résultats

3.1 Analyse du réservoir composite

Contrôle de la qualité de fabrication du réservoir composite présentant une déchirure:

Les analyses réalisées sur le réservoir composite de la bouteille n° 1 (incident de Genève) ne mettent pas en évidence

de problème quant à sa qualité de fabrication, à savoir:

- la résine utilisée correspond bien à une résine époxy et est correctement polymérisée ($T_g > 85\text{ °C}$);
- les séquences d'empilement des renforts déterminées dans la partie cylindrique sont conformes au plan de drapage fourni. Les angles d'enroulement et les épaisseurs mesurés au niveau du

fond de la bouteille ont pu être corrélés aux valeurs théoriques définies par calculs;

- les valeurs de contraintes à la rupture mesurées lors d'essais de traction sur anneaux NOL prélevés dans la partie cylindrique des bouteilles n° 1 et n° 6 sont très proches (840 MPa en moyenne). Elles sont cohérentes avec les propriétés mécaniques connues d'une fibre de carbone T700 (fibre utilisée pour la fabrication de ces réservoirs composites);
- les examens microscopiques réalisés dans la zone de déchirure mettent en évidence quelques porosités créées lors de la fabrication mais globalement, le composite ne contient pas de défaut de fabrication majeur.

Examen macro- et microscopique de la déchirure présente dans le réservoir composite:

Compte tenu du caractère fortement énergétique de la rupture qui a généré un grand nombre d'endommagements, il ne nous est pas possible de définir le mode de ruine à l'origine de la défaillance. Certaines informations ressortent toutefois de l'examen des différents éléments de la bouteille:

- la protection en mousse élastomère était bien présente sur le fond de la bouteille au moment de l'incident et a été déchirée lors de l'ouverture du réservoir;
- le caractère localisé de la déchirure (7 cm environ) nous indique qu'elle ne peut être due à une surpression. En effet, les essais d'éclatement en pression ont montré qu'une telle rupture aurait été beaucoup plus catastrophique et se serait étendue sur l'ensemble du réservoir;
- les rayures très marquées sur la surface du composite non protégée par la coquille élastomère, à proximité de la déchirure, nous laissent à penser que le réservoir a subi un choc assez violent à cet endroit;
- au niveau de la déchirure, l'orientation des fibres de carbone vers l'extérieur du réservoir indiquerait que la rupture finale du composite a eu lieu sous l'effet de la pression interne résiduelle;
- après déchirure de l'enveloppe composite, une hernie a été créée dans le liner sous l'effet de la pression (le liner ne possède qu'une fonction étanchéité, l'enveloppe composite assurant la résistance mécanique).

Analyse mécanique du comportement du réservoir:

● Comportement en service

L'analyse mécanique du comportement des bouteilles composites sous une pression de 300 bars montre que:

- parties composites:

Sur les fonds de la bouteille, les contraintes dans une zone étendue ($1/3$ de la circonférence du fond environ) proche des extrémités dépassent la première rupture de couche. Cet endommagement ne semble pas évoluer lors de cyclages en pression, par contre la présence de contraintes internes peut généraliser cet état d'endommagement, sur toute la bouteille. La tenue à un niveau de pression maximal n'est pas affectée par cet endommagement par contre ces ruptures de premières couches doivent affecter l'étanchéité de la partie composite de la bouteille. La présence d'un défaut local dans la zone la plus mince du fond n'affaiblit pas la capacité de la bouteille sous 300 bars.

- inserts métalliques:

Sous une pression de 300 bars, les inserts en aluminium sont fortement sollicités dans la zone de filetage avec le liner. Des plastifications locales sont à prévoir.

- liner:

Le niveau de contraintes sous 300 bars de pression dans le liner est important notamment dans la zone de changement de courbures. Une utilisation en continu peut provoquer une augmentation des déformations par fluage du matériau.

Le schéma ci-dessous décrit les zones faibles en service à 300 bar:

● Conditions de remplissage

Le calcul dans les conditions de remplissage montre que les contraintes dues à l'échauffement et au gradient de température sont relativement faibles. Il ne semble pas y avoir de risques d'endommagements supplémentaires sur la partie composite.

● Déformations à la liaison entre le liner et l'insert métallique côté robinet

Lors de la phase de vidage, la diminution de température locale au niveau de la sortie du robinet provoque un décollement du liner s'il n'est pas totalement solidaire de l'insert. De plus le niveau de contraintes dans le liner lors du vidage dépasse dans deux zones la limite élastique du matériau. Des déformations irréversibles sont donc possibles sur le liner. Sous l'action de la pression de 300 bars un décollement local est aussi présent entre le liner et l'insert.

● Comportement aux chocs

Le niveau d'accélération à atteindre pour obtenir une première rupture des couches (choc vertical sur le fond - partie peu protégée par la coquille en élastomère de faible épaisseur à cet endroit) est de l'ordre de 3300 g. Or une chute de la bouteille d'une hauteur de 1,20 m sous son propre poids correspond à une accélération d'environ 430 g, ce qui ne peut pas entraîner de rupture du composite.

Seul un choc d'une grande violence a pu endommager le réservoir composite dans la zone de déchirure.

3.2 Analyse de la rupture des robinets:

Les deux robinets n° 1 et n° 5 présentent des ruptures brutales ductiles qui se sont développées avec de légères déformations, au droit de la partie fileté (M18×1,50). Ce type de rupture (ductile) qui, a priori, ne met pas en cause la qualité du matériau, doit être dû à une surcharge: soit une suppression, soit un choc important¹.

La présence des microfissures constatées dans le rayon raccordant la partie cylindrique de 18 mm de diamètre à l'épaulement, confirme que ces deux robinets ont été soumis à des sollicitations méca-

niques anormalement élevées. Il faut noter que le robinet repéré 2 (non rompu) ne comporte pas de microfissure dans le congé de raccordement ni en fond de file.

Au niveau des ruptures, les examens micrographiques et les mesures de dureté ont révélé sur les deux robinets n° 1 et n° 5 une qualité métallurgique satisfaisante pour un laiton CuZn40Pb2. Aussi (pour ce laiton) la qualité métallurgique ne peut pas a priori être mise en cause pour expliquer la rupture de ces deux robinets.

D'autre part, les calculs indiquent que dans la section du robinet soumise à un couple de serrage nominal d'environ 85Nm (et en tenant compte des imprécisions liées à la méthode de serrage), les contraintes sont très proches de la limite élastique du laiton². Ces contraintes doivent dépasser la limite élastique du matériau au bord du trou et dans le filetage. Le coefficient de sécurité sur le robinet en utilisation normale est très faible.

3.3 Etude de l'étanchéité du système

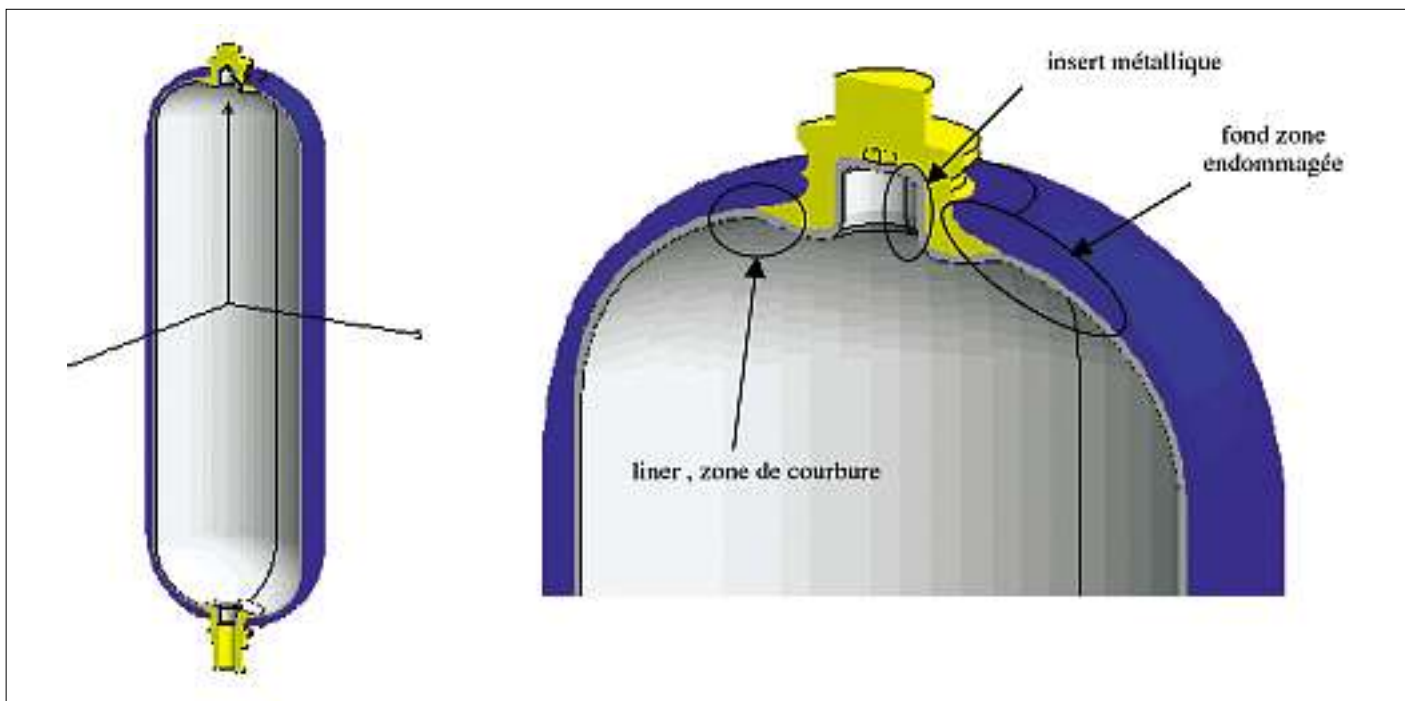
- Sur toutes les bouteilles testées (n° 2, n° 3, n° 4, n° 7, n° 9), les fuites mesurées varient entre 10^{-3} et 10^{-2} atm cm³ s⁻¹, ce qui correspond à des valeurs bien supérieures à celles indiquées dans les spécifications (<0,25 ml/h/litre de volume de bouteille).

Ce débit de fuite n'a pas de conséquence sur l'autonomie de la bouteille initialement pleine mais peut influencer sur la capacité de stockage.

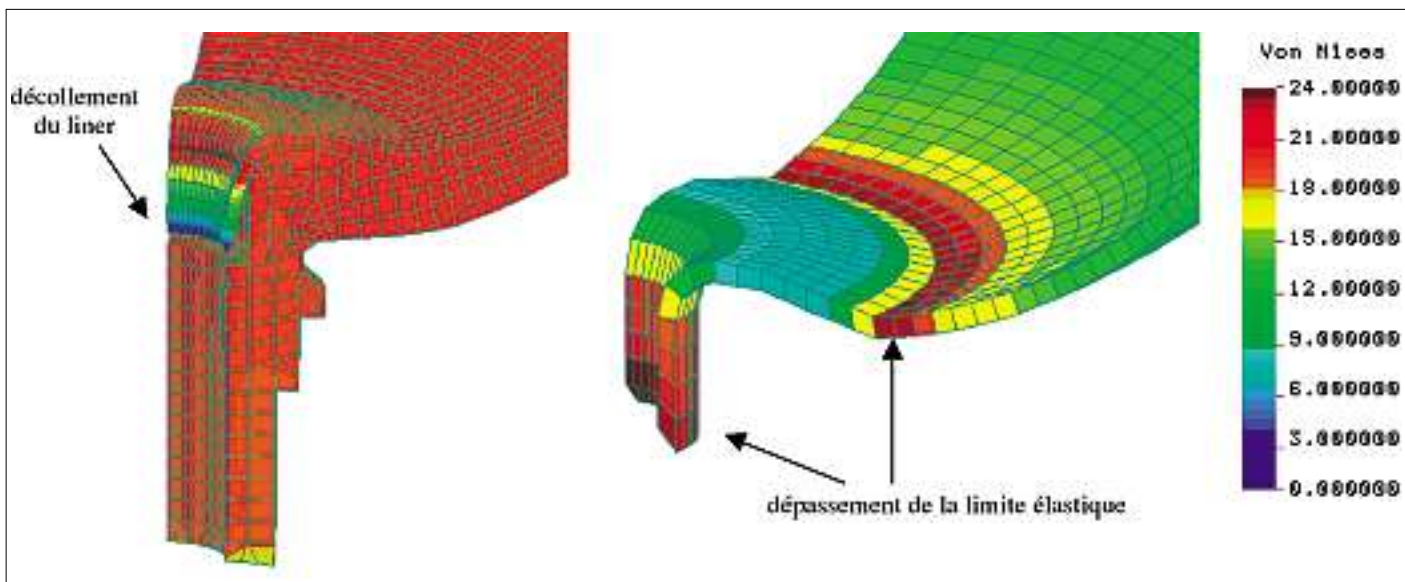
- Sous l'effet du froid (test à -50 °C), les fuites peuvent augmenter d'un facteur 1000 au niveau du côté du robinet. La fuite a pu être localisée entre le liner et l'insert métallique grâce à des essais complémentaires au niveau du réservoir côté robinet. Ceci corrobore les résultats des calculs en température qui indiqueraient une tendance du liner à se décoller de l'insert métallique lors du vidage de la bouteille (à froid), créant ainsi un chemin de fuite.

¹ Traces de chocs constatées sur les deux robinets n° 1 et 5

² Lors de ces calculs, la contrainte moyenne dans la section du robinet a été évaluée à environ 150 MPa. Les caractéristiques du matériau ont été définies à partir de mesures de dureté Vickers réalisées sur un robinet non déformé au niveau du filetage (dureté mesurée: environ 90 HV10, ce qui correspond à une limite d'élasticité de l'ordre de 160 MPa d'après la norme EN12164).



Zones faibles sous une pression de 300 bars.



Déformations et contraintes dans le liner, lors du vidage.

Conclusions

Compte tenu:

- du contexte de l'incident de Genève,
 - de la qualité de fabrication du réservoir composite et de son dimensionnement,
 - de l'aspect de la déchirure,
- l'hypothèse que la déchirure présente dans le réservoir composite ait pu être créée par une surpression ou par la chute de la bouteille de hauteur d'homme sous son propre poids n'est pas envisageable.
- En effet les calculs montrent qu'un choc très violent est nécessaire pour aboutir à une rupture des couches du composite (accélération nécessaire

20 fois plus importante qu'une chute de 1,20 m).

Par contre, les calculs indiquent que le robinet est la zone de fragilité de la bouteille. En effet, lorsqu'on applique un couple de serrage de 85 Nm, les contraintes dans la section du robinet sont très proches de la limite élastique du laiton (coefficient de sécurité très faible). Le scénario qui nous apparaît le plus probable est donc le suivant:

- le robinet a rompu dans un premier temps sous l'effet d'un choc (par exemple:
 - la bouteille est tombée de la caisse dans laquelle elle était entreposée,
 - le pompier a pris la bouteille par le

robinet, l'a ouvert accidentellement et l'a laissée tomber. Le robinet a pu se rompre à ce moment ou lorsque la bouteille s'est mise à tourner et a percuté un obstacle [mur, pilier ...]);

- la bouteille a ensuite subi des chocs très violents sous l'effet de la propulsion (plafond ...) qui ont conduit à la déchirure du réservoir.

En fait, cette étude qui a porté sur l'ensemble de la bouteille ARI tout composite a mis en évidence deux points à améliorer:

- le robinet;
- l'étanchéité de la bouteille.

Au niveau du robinet, plusieurs actions d'amélioration peuvent être envisagées:

- **changer le matériau** (cf. tableau ci-joint indiquant les caractéristiques mécaniques pour le laiton et un acier inox);
- limiter le couple de serrage dans la mesure du possible (tout en garantissant la fonction étanchéité);
- placer des protections autour du robinet pour éviter les chocs;
- installer un limiteur de débit au niveau du robinet pour éviter que la bouteille ne soit propulsée en cas de rupture du robinet.

En ce qui concerne l'étanchéité de la bouteille, les fuites étant importantes au niveau du robinet entre le liner et l'insert métallique, des modifications de la conception de cette liaison devraient permettre de diminuer les débits de fuite (modification de géométrie, amélioration de la cohésion entre l'insert métallique et le liner).

D'autre part, d'après notre expérience, il paraîtrait intéressant:

- d'établir des procédures de qualification adaptées à la fonction des bouteilles en service;
- de définir des procédures de contrôle en fabrication et en service (notamment au niveau de la maintenance).

Enfin, compte tenu de la dangerosité de la phase de remplissage des bouteilles (effets thermiques ...), limiter les interventions humaines à proximité ainsi que la vitesse de remplissage des bouteilles, éviter tout composant pouvant avoir un effet de remplissage/vidage rapide nous paraissent être des mesures de sécurité complémentaires.

Recommandations de la FSSP sur la base des conclusions du CETIM

Après avoir pris connaissance du procès-verbal du CETIM, le chef du dicastère technique de la FSSP, d'entente avec groupe de travail pour les questions techniques de protection respiratoire, constate que

- **l'analyse démontre que la bouteille n'a pas éclaté et que la déchirure sur son fond résulte d'un impact. La même conclusion est également valable pour la rupture du robinet.** Dès lors, il a été décidé
- **d'annuler avec effet immédiat la recommandation de la FSSP du 4 octobre 2002 concernant le retrait momentané des bouteilles en matériau tout composite.**

Recommandations

- Il est recommandé aux membres des corps de sapeurs-pompiers d'observer strictement les directives d'utilisation des fabricants et des fournisseurs de bouteilles. Le groupe de travail FSSP pour les questions de protection respiratoire est chargé de préparer une directive concernant l'utilisation et la manipulation des bouteilles sous pression.

- Toutes les bouteilles d'air comprimé qui ne sont pas montées sur un appareil de protection respiratoire doivent être équipées d'un bouchon métallique à visser conformément à la norme EN 144-2.
- Un dispositif de limitation de débit ou tout autre équipement similaire qui empêche que la bouteille ne soit propulsée en cas de rupture du robinet est recommandé. Les détails techniques ainsi que les questions de responsabilité sont à vérifier auprès des fournisseurs.

Remarque

- Les résultats de l'analyse ont démontré que toutes les bouteilles en matériau tout composite du fabricant MCS examinées ne sont pas étanches. Si des pertes supérieures à la norme sont constatées sur ce type de bouteilles, il est impératif de prendre contact avec votre fournisseur. Le fabricant des bouteilles s'est engagé à remplacer sans frais les bouteilles non étanches.

Le contrôle d'étanchéité doit être effectué dans un environnement ayant une température et une humidité stables.

Fédération suisse des sapeurs-pompiers

*Le chef du dicastère technique
Jean-Luc Berner*

*Le chef technique
Claude Berger ♦*

Matériau	Normes	Etat métallique	HB	HV	Limite d'élasticité (MPa)	A (%)
CuZn40Pb2	EN12420	H080	80	85	120	20
	EN12164	R380	90	160	18	
		R430	120	250	10a	
		R500	150	390	8	
Acier Inox Ex : 2CrNiMo17-12-2	EN10088-3	Etat adouci		200	40	

Tableau 2: valeurs de dureté et de limite d'élasticité données à titre indicatif par les normes EN12420 et EN12164.